برآورد نیرو و ازدیاد طول در فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای *

مریم خلیلی [۱]　　فرامرز فرشته صنیعی [۲]　　مهرداد پورسینا [۳]

چکیده *یکی از انواع قالب‌های پیش‌فرم در آهنگری قالب بسته، قالب فولر است. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود و انجام آزمایش‌های مدل، به مطالعه جریان فلز و نیروی لازم در فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای پرداخته می‌شود. برای انجام این آزمایش‌ها از سرب به عنوان مادّه مدل بیلت و از قالب‌های فولادی به عنوان ابزار استفاده می‌شود. صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند به روش اجزاء محدود از مقایسه‌ی این نتایج با نتایج تجربی موجود تعیین می‌گردد. از آن‌جایی که آزمایش‌های تجربی دارای محدودیت در ابعاد هستند، جهت افزایش دامنه‌ی متغیرها از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار تجاری Ansys استفاده می‌شود. سپس با استفاده از رگرسیون خطی و با تکیه بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی، روابطی برای پیش‌بینی توزیع طولی و عرضی مواد و هم چنین نیروی مورد نیاز برای فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای به‌دست می‌آید. نتایج حاصل از این تحقیق به طراحان کمک می‌کند تا به جای صرف هزینه و زمان، ابعاد بیلت را پس از انجام فرآیند و نیروی مورد نیاز، طی فرآیند فولر چهارضربه‌ای را به سادگی پیش‌بینی نمایند.*

واژه‌های کلیدی آهنگری، فولرینگ، ازدیاد طول، ازدیاد عرض، نیرو، روش اجزاء محدود

Estimation of Load and Elongation in the Four-Blow Fullering Process

M. Khalili　　F. Fereshteh-Saniee　　M.Poursina

Abstract *The fuller die, which is used for elongated components, is a type of perform die employed in the closed-die forging process. In this research, using the finite-element method and the model test technique, both the required load and material flow are studied for the four-blow fullering operation. The experiments are conducted using lead as the model material and steel tools. Comparison of the numerical predictions and experimental results show a good agreement between them. For the extension of various process variables, FEM simulations are performed using ANSYS commercial software. Then, by means of linear regression and based on the finite-element results, some useful relationships are proposed for prediction of elongation, sideways spread and the required load for the four-blow fullering process. The designers can use the results of this investigation for prediction of elongation, sideways spread and fullering load instead of time consuming and expensive experiments.*

Key Words Forging, Fullering, Elongation, Sideways spread, Load, Finite element method.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۸/۲/۱۲ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/٦/۱۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، کارشناس ارشد، مربی، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

(۲) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(۳) استادیار، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

مقدمه

در فرآیند آهنگری در قالب بسته با توجه به میزان پیچیدگی قطعه‌ی نهایی، یک یا چند عملیات پیش‌فرم بر روی بیلت انجام می‌گیرد که این فرآیندهای پیش‌فرم به ترتیب در قالب‌های فولر، رولر و بلوکر می‌باشند[۱]. قالب فولر، در عملیات آهنگری به منظور کاهش سطح مقطع در ناحیه‌ی خاصی از بیلت و افزایش طول در همان ناحیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور، ناحیه‌ی مورد نظر از بیلت، بین دو نیمه قالب قرار گرفته و تحت دو یا چهار ضربه‌ی متوالی قرار می‌گیرد. بین هر دو ضربه‌ی متوالی، بیلت حول محور طولی خود دوران می‌کند تا سطح مقطع نهایی بیلت تقریباً به شکل مربع شود[۲]. در فرآیند پیش‌فرم فولر، مواد می‌توانند آزادانه در جهت‌های طولی و عرضی جریان یابند. از این رو پیش‌بینی توزیع طولی و عرضی مواد در این فرآیند حائز اهمیت است. از طرف دیگر، با برآورد نیروی آهنگری مورد نیاز، می‌توان ماشین شکل‌دهی مناسب را انتخاب نمود[3].

تاکنون کوشش‌های بسیاری برای رایانه‌ای نمودن طراحی قالب فولر صورت گرفته است. ابتدا بیسواس و نایت [4]، برنامه‌ای تهیه نمودند که با استفاده از سطوح مقاطع قطعه در نقاط مختلف، قالب‌های فولر را طراحی می‌نمود. چان و همکاران [5]، موفق به تهیه‌ی نرم‌افزاری شدند که به روشی مشابه، قالب‌های پیش‌فرم از جمله فولر را طراحی می‌نمود. سپس چوئی و دین [6,7]، با ارائه‌ی روشی جامع، نرم‌افزاری برای طراحی قالب‌های پیش‌فرم از جمله فولر ارائه کردند. فرشته صنیعی و همکاران [8]، با تهیه‌ی یک نمودار گردشی و نرم‌افزار رایانه‌ای به طراحی قالب‌های پیش‌فرم و نهایی آهنگری قطعات نامتقارن محوری پرداخت. حقیقت و صادقی [۹]، یک نمودار گردشی و نرم‌افزار رایانه‌ای برای طراحی قالب‌های پیش‌فرم و نهایی برای فورجینگ قطعات طولی تهیه نمود. ملکیان[۱۰]، به کمک مدل‌سازی فیزیکی قالب‌های پیش‌فرم و نهایی فورجینگ، قطعات پیچیده‌ای مانند سگ دست اتومبیل نیسان را طراحی نمود. در این مقاله، پس از انجام آزمایش‌های عملی، فرآیند فولر در نرم افزار Ansys شبیه‌سازی شده است. سپس با تکیه بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی و با استفاده از یک نرم‌افزار آماری، روابطی تعیین گردیده تا به کمک آن‌ها بتوان نیروی آهنگری مورد نیاز طی فرآیند و تغییر ابعاد بیلت پس از فرآیند فولرینگ را پیش‌بینی نمود. مزیت شاخص این تحقیق، پیش‌بینی نیرو و ابعاد نهایی بیلت می‌باشد؛ در صورتی که در پژوهش‌های گذشته استفاده یا عدم استفاده از فرآیند فولرینگ را پیشنهاد می‌کند و یا این که ابعاد قالب فولر را مشخص می‌نماید.

فرآیند فولرینگ

قالب فولر، معمولاً اولین قالب پیش‌فرمی است که در عملیات آهنگری مورد استفاده واقع می‌شود. این نوع قالب پیش‌فرم برای قطعاتی که یک بعد افقی (طول) آن‌ها از بعد افقی دیگر (عرض) بزرگتر است، بیشتر به کار برده می‌شود. چنین قطعاتی را اصطلاحاً قطعات آهنگری طولی می‌نامند که درصد زیادی از قطعات آهنگری را تشکیل می‌دهند[۲].

قالب فولر، مواد بیلت را در امتداد طول آن جابه‌جا می‌کند. در واقع، قالب مزبور به منظور کاهش سطح مقطع در قسمتی از بیلت و افزایش طول در همان ناحیه مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲]. بیلتی که در قالب فولر جای می‌گیرد، معمولاً تحت دو الی چهار ضربه قرار می‌گیرد و بین هر دو ضربه، حول محور طولی خود، ۹۰ درجه چرخانده می‌شود. به دلیل آن که جایگذاری قطعه در قالب مزبور توأم با خطا می‌باشد، بهتر است بیلت مورد نظر، تحت دو ضربه قرار گیرد. در این صورت، نرخ تولید افزایش خواهد یافت[3].
هندسه یک قالب فولر توسط پروفیل‌های طولی(Longitudinal Profile) و عرضی (Transverse Profile) آن مشخص می‌گردد. هر یک از پروفیل‌های طولی و عرضی بر دو قسم هستند. پروفیل طولی می‌تواند تخت(Flat) و یا قوسی(Crowned)

باشــد و پروفیــل عرضــی مــی‌توانــد تخــت و یــا شیاری(Grooved) باشد. بدین ترتیب، چهار نوع قالب فولر حاصل خواهد شد.

انجام آزمایش‌های عملی

تعیین معادله‌ی ساختاری و ضریب اصطکاک

بـرای تعیـین نمـودار تـنش-کـرنش واقعـی سـرب و به‌کـارگیـری آن در شـبیه‌سـازی‌هـا، از آزمـایش فـشار استفاده شد [11]. بـر اسـاس نتـایج آزمـایش فـشار در دمای محیط، معادلـه‌ی سـاختاری سـرب، بـه صـورت معادله‌ی (۱) تعیین گردید.

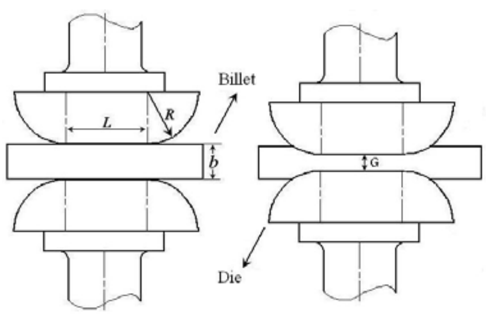
$$\bar{\sigma} = 36.28\varepsilon^{0.3} \text{ (MPa)} \qquad (۱)$$

برای ارزیابی و تعیین شرایط اصطکاکی در سطح تماس قالب با بیلت از آزمایش حلقه استفاده شد. بدین منظور از حلقه‌های سربی با نسبت ارتفاع، قطـر داخلـی، قطـر خارجی برابر بـا ۶:۳:۲ و قطـر خـارجی ۳۹ میلـی‌متـر استفاده شده است. بر اساس منحنـی‌هـای کالیبراسـیون موجود در [12]، ضرایب اصطکاک مربـوط بـه حالـت بدون روانکار، روانکار پودر سمباده و روانکار گـریس، به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۵۷۷ و ۰/۰۶۸ حاصل گردیدند.

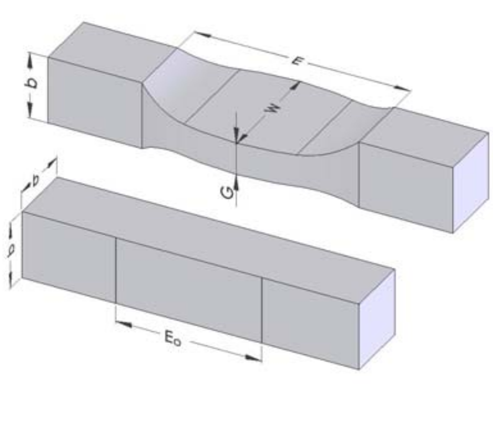
برای انجام تمامی آزمایش‌های فولرینگ، فشار و حلقـه از نـرخ کـرنش تقریبـاً یکـسان، ($\dot{\varepsilon} = 0.005s^{-1}$)، و از دستگاه پرس ۶۰ تن اینسترون(Instron) که دارای دقت بالایی در سنجش نیروی آهنگری است، استفاده شد.

انجام آزمایش‌های فولرینگ

برای انجام آزمایش‌های عملی، ابتدا قالب‌ها و بیلت‌هـا طراحی مـی‌شـوند. جـنس قالـب‌هـا از فـولاد St37 و بیلت‌ها از جنس سرب نرم می‌باشـند؛ رفتـار سـرب در دمای محیط، مانند رفتار فولاد داغ می‌باشـد، بـه همـین دلیل از سرب به عنوان ماده مدل استفاده مـی‌شـود. در آزمایش‌ها از سه نوع قالب تخت-تخت بـا طـول‌هـای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر، عرض ۶۰ میلی‌متر و شعاع لبـه ۲۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. بیلت‌ها، قطعات منـشوری شـکل بـا مقطـع مربعـی ۱۰×۱۰، ۲۰×۲۰ و ۳۰×۳۰ میلی‌متر می‌باشند. شکل (۱)، نحوه‌ی قرار گرفتن قالب فولر تخت-تخت و بیلت با سطح مقطع مربعـی قبـل و پس از ضربه اول را نشان می‌دهد. کـه در آن L؛ طـول قالب، b؛ عرض بیلت، G؛ دهانه‌ی قالب وR؛ شعاع لبـه می‌باشد. هر آزمایش، طی چهار ضربه و هـر ضـربه در چند مرحله انجام شد تا بتوان در نهایت، ابعاد دقیق‌تری داشت. در هر ضربه، نیروی شکل‌دهـی، میـزان ازدیـاد طـول و هـم چنـین مـاکزیمم توزیـع عرضـی فلـز، اندازه‌گیری و یادداشت می‌گـردد. بـرای داشـتن سـطح مقطع نهایی به شکل مربع و با توجـه بـه ثابـت بـودن قالب‌ها بین هر دو ضـربه‌ی متـوالی، بیلـت ۹۰ درجـه حول محور طولی خود دوران می‌کند(شکل ۱).



الف) نحوه‌ی قرار گرفتن قالب و بیلت قبل از انجام فرآیند(سمت راست) و پس از ضربه‌ی اول(سمت چپ)

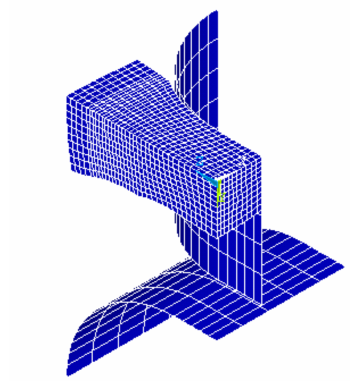


ب) ابعاد بیلت قبل از انجام فرآیندو پس از ضربه‌ی اول

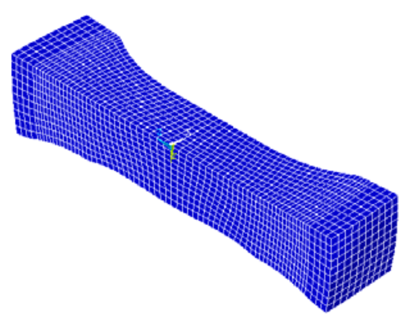
شکل۱ قالب و بیلت قبل از انجام فرآیند و پس از ضربه‌ی اول

شبیه‌سازی فرآیند فولرینگ

در شبیه‌سازی‌ها برای بررسی فرآیند، ابتدا بر اساس سه صفحه‌ی تقارن موجود برای مجموعه، یک چهارم قالب و یک هشتم بیلت مدل‌سازی گردیده است. المان‌های بیلت از نوع Visco 107 و المان‌های تماسی از نوع Contact 174 تعریف شده‌اند. مدل اصطکاکی مورد استفاده، ترکیبی از اصطکاک خشک و چسبنده می‌باشد. شایان ذکر است که به دلیل وجود شرایط مرزی روی یک- هشتم بیلت به جای دوران بیلت به اندازه‌ی ۹۰ درجه، دو قالب مورد استفاده قرار می‌گیرد که راستای حرکت آن‌ها عمود بر هم است (شکل ۲).



الف) یک هشتم از بیلت و یک چهارم قالب‌های شبیه سازی شده در Ansys پس از ضربه‌ی چهارم فرآیند فولرینگ است



ب) بیلت شبیه‌سازی شده در Ansys پس از ضربه چهارم فرآیند فولرینگ

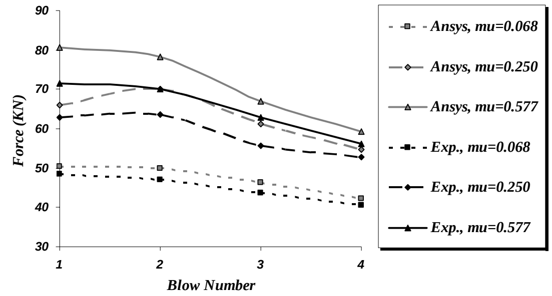
شکل۲ نمونه مدل‌سازی شده قالب تخت-تخت و بیلت در نرم‌افزار Ansys و شکل نهایی بیلت

جابه‌جایی قالب اول با استفاده از اطلاعات موجود در آزمایش‌های عملی تعیین می‌شود. سپس قالب اول به حالت اولیه برمی‌گردد و جابه‌جایی لازم به قالب دوّم داده می‌شود. در شکل (۲)، یک نمونه از مدل‌سازی قالب، بیلت و المان‌ها قبل از تحلیل، نشان داده شده است. در پایان هر شبیه‌سازی، میزان درصد افزایش طول بیلت و نیروی فولرینگ در انتهای هر ضربه و میزان افزایش عرض بیلت در ضربه‌ی اول اندازه‌گیری می‌شود.

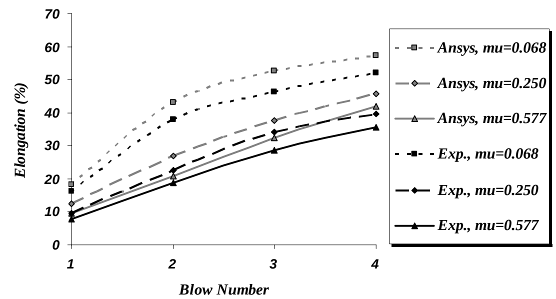
مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و تجربی

برای تأیید نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای، منحنی‌های درصد افزایش بعد عرضی برای ضربه‌ی اول بر حسب درصد کاهش ارتفاع و درصد ازدیاد طول نهایی و نیروی بیشینه در هر ضربه با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی مقایسه شده‌اند (شکل‌های ۳ تا ۵). این شکل‌ها نشان می‌دهند نتایج تجربی و شبیه‌سازی از مطابقت قابل قبولی برخوردارند.

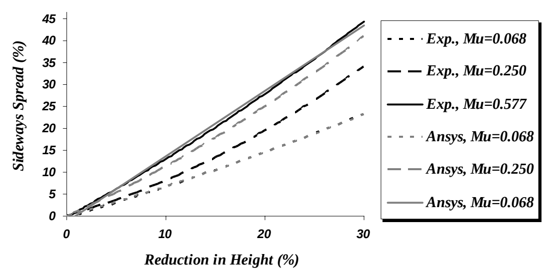
همان گونه که از شکل (۳) مشاهده می‌گردد، با افزایش ضریب اصطکاک، ازدیاد طول بیلت کاهش یافته و تمایل به توزیع عرضی مواد افزایش می‌یابد. چون بعد عرضی بیلت‌ها کوچک‌تر از بعد طولی آن‌هاست، مواد تمایل به حرکت در راستای عرضی دارند؛ به همین دلیل با افزایش ضریب اصطکاک، میزان درصد ازدیاد طول، کاهش می‌یابد. بنابراین یکی از پارامترهایی که با تغییر آن می‌توان ابعاد بیلت را پس از فرآیند به مقدار مورد نظر نزدیک کرد، تغییر ضریب اصطکاک و استفاده از روانکار است. هم‌چنین با کم کردن ضریب اصطکاک می‌توان با تعداد ضربات کم‌تری به ابعاد مورد نظر رسید و از قالب با عرض کم‌تر استفاده نمود. با افزایش ضریب اصطکاک بین قالب و بیلت نیروی لازم جهت فولرینگ افزایش می‌یابد.



الف) منحنی نیروی بیشینه در هر ضربه



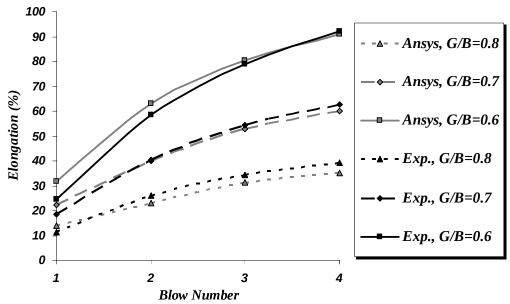
ب) درصد افزایش طول بیلت پس از هر ضربه



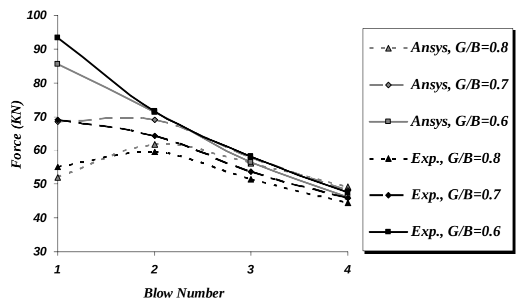
ج) درصد افزایش عرض بیلت در ضربه‌ی اول بر حسب درصد کاهش ارتفاع

شکل۳ نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی (خطوط مشکی رنگ) و شبیه‌سازی (خطوط خاکستری رنگ) برای قالب تخت-تخت به طول ٦٠ میلی‌متر، بیلت مربعی با عرض ۲۰ میلی‌متر و آهنگری با سه ضریب اصطکاک مختلف

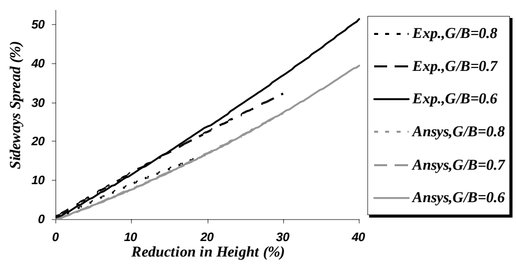
در شکل (٤)، مقدار دهانه‌ی قالب فولر تغییر کرده است. با کاهش دهانه‌ی قالب در هر ضربه، درصد کاهش ارتفاع افزایش یافته و باعث می‌شود که حجم تغییر شکل یافته و درصد افزایش طول، عرض و نیروی فولرینگ مورد نیاز افزایش یابد. قابل به ذکر است دهانه‌ی قالب در عمل با توجه به مقطع نهایی که بیلت بایستی داشته باشد، انتخاب می‌گردد.



الف) منحنی نیروی بیشینه در هر ضربه



ب) درصد افزایش طول بیلت پس از هر ضربه



ج) درصد افزایش عرض بیلت در ضربه‌ی اول بر حسب درصد کاهش ارتفاع

شکل٤ نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی برای قالب تخت-تخت به طول ٤٠ میلی‌متر، بیلت مربعی با عرض۳۰ میلی‌متر، آهنگری خشک و با سه دهانه قالب متفاوت(G/B نسبت دهانه قالب به عرض بیلت می‌باشد)

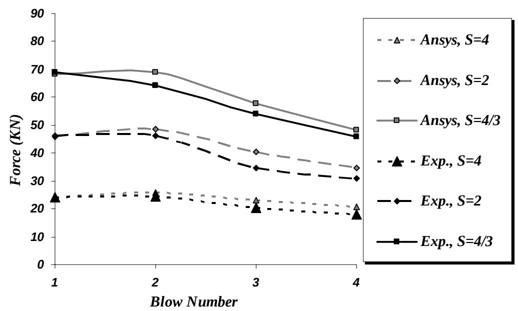
با مشاهده‌ی شکل (٥) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت ابعادی (عرض بیلت/طول قالب)=S، حداکثر نیروی آهنگری کاهش یافته است. روشن است

که برای تغییر شکل بیلت‌های کوچک‌تر با حجم و وزن کم‌تر، نیاز به نیروی کم‌تری می‌باشد؛ زیرا با کاهش حجم تغییر شکل یافته، میزان نیرو کاهش می‌یابد. هم‌چنین علت کاهش نیرو در ضربات بالاتر هر فرآیند نیز کاهش ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک و نیز کاهش درصد کاهش ارتفاع در ضربات سوم و چهارم در قطعه می‌باشد که این، خود ناشی از بشکه‌ای شدن سطوح در یک ضربه و کاهش سطح تماس ابزار و قطعه در ضربه بعدی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بیشترین اختلاف‌های بین نتایج تجربی و عددی در مورد بیلت‌ها با ابعاد بزرگ‌تر است. امکان وقوع نقایص ریخته‌گری و اختلاف خواص مادّی در مورد بیلت‌های بزرگتر بیشتر است که این اختلاف‌ها می‌تواند ناشی از این نکته باشد.

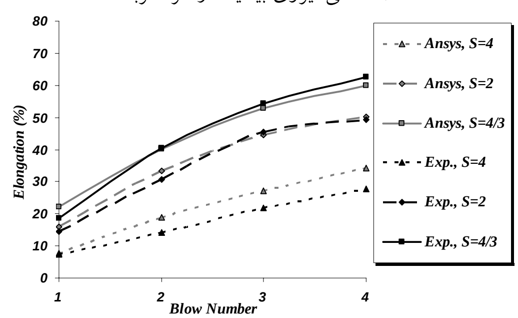
هم‌چنین در قسمت ب و ج شکل (۵) ملاحظه می‌شود، هر چه نسبت ابعادی کم‌تر شده، درصد افزایش طول قطعه‌کار افزایش یافته است. بنا به اظهار تاملینسون[13]، یکی از عوامل مهم و مؤثر در توزیع مواد در آهنگری قالب باز، نسبت ابعادی قالب و بیلت (S) می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در یک فرآیند فولرینگ چهار ضربه‌ای نیز چنین شرایطی وجود دارد و هنگامی‌که نسبت طول به عرض سطح تماس قطعه و قالب افزایش می‌یابد، از ازدیاد طول قطعه کاسته می‌شود. با توجه به این که طول بیلت بیشتر از عرض آن می‌باشد، اصطکاک طولی نسبت به اصطکاک عرضی بیشتر است و مواد در امتداد عرضی راحت‌تر جریان می یابند.

تعیین روابط

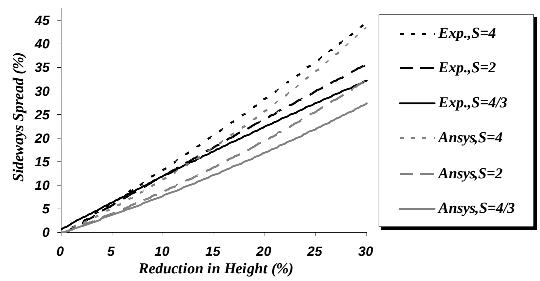
در این بخش، برای فولرینگ چهار ضربه‌ای با قالب تخت-تخت و بیلت با سطح مقطع مربعی روابطی تعیین می‌شود. با استفاده از این روابط، طراحان می‌توانند به جای صرف هزینه و زمان، ابعاد بیلت را پس از انجام فرآیند و نیروی فولرینگ مورد نیاز فرآیند را پیش‌بینی نمایند.



الف) منحنی نیروی بیشینه در هر ضربه



ب) درصد افزایش طول بیلت پس از هر ضربه



ج) درصد افزایش عرض بیلت در ضربه‌ی اول بر حسب درصد کاهش ارتفاع

شکل۵ نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی برای قالب تخت- تخت به طول ۴۰ میلی‌متر، بیلت‌های مربعی با سه عرض۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر، آهنگری خشک و با سه نسبت ابعادی (s=L/b)

برای افزایش دامنه‌ی متغیرها، ۲۴۳ فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای با ترکیب خطی پارامترهای ارائه شده در جدول(۱) شبیه‌سازی می‌شود. با تکیه بر نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها و با استفاده از روش رگرسیون خطی، روابط (۲ الی ۵) بر روی داده‌ها

برازش شده است [15]. در این روابط از تخمین غیرخطی سیستم معادلات با روش مینیمم مجذور مربعات خطای نرم افزار Eviews استفاده شده است. Eviews نرم‌افزاری است که در سال ۱۹۹٤ برای اولین بار برای تجزیه و تحلیل آماری و برای استفاده‌ی اقتصاددانان به بازار جهانی عرضه شد[14]. برای دستیابی به این روابط، ابتدا نتایج به دست آمده از Ansys در یک فایل Excel ذخیره شده و سپس با وارد کردن این نتایج به عنوان ورودی وتعریف فرم اولیه‌ی رابطه برای نرم افزار، روابطی به عنوان خروجی از نرم‌افزار گرفته شده است.

جدول ۱ مقادیر عددی پارامترهای متغیّر مربوط به شبیه‌سازی‌ها برای به دست آوردن روابط (R؛ شعاع لبه‌ی قالب، L؛ طول قالب، b؛ عرض بیلت، μ؛ ضریب اصطکاک و G؛ دهانه قالب است).

μ	L (mm)	B (mm)	R (mm)	G/b
0.068	20	10	15	0.8
0.25	40	20	25	0.7
0.577	60	30	35	0.6

همان طور که قسمت الف شکل‌های(۳ تا ۵) نشان می‌دهد، مقدار نیرو در انتهای ضربه اول یا دوم بیشینه است. در انجام فرآیندهای شکل‌دهی، بیشترین مقدار نیرو جهت انتخاب پرس یا چکش حائز اهمیت است؛ لذا نیرو در ضربه‌های اول و دوم تعیین و نیروی بزرگ‌تر جهت انتخاب پرس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رابطه‌ی (۲) نیروی آهنگری را برای ضربه اول نشان می‌دهد. مینیمم مجذور مربعات خطا در این رابطه،R2، ۰/۸٤ است. R2 محکی برای میزان برازش رابطه‌ی انتخابی با اطلاعات ورودی به نرم‌افزار و یا به عبارت دیگر مقدار خطای رابطه به‌دست آمده می‌باشد که عددی بین صفر و یک است. هر چه این عدد به یک نزدیکتر باشد، میزان پراکندگی نتایج شبیه‌سازی نسبت به رابطه‌ی به دست آمده کم‌تر می‌باشد.

$$F_1 = \left|377.50r + 901.32L + 2771.89^{0.95} + 127\mu^{206.32}\right.$$
$$\left.302442.3\left(\frac{G}{b}\right)^{0.26} - 379265.8\right| , R^2 = 0.84 \qquad (۲)$$

رابطه‌ی (۳) بیانگر نیروی آهنگری در ضربه‌ی دوم می‌باشد. در این رابطه،R2 ، ۰/۹۰ است.

$$F_2 = \left|16221.3R^{0.05} + 268.72L^{1.26} - 423983.1b^{0.13}\right.$$
$$\left.- 23470.1\mu^{0.24} - 41233.25\left(\frac{G}{b}\right)^{4.68} + 159387.2\right| ,$$
$$R^2 = 0.9 \qquad (۳)$$

یکی از پارامترهای مهم طراحی قالب فولر، عرض قالب است. اگر عرض قالب از مقدار مورد نیاز بیشتر باشد، موجب افزایش مقدار ماشینکاری و صرف هزینه‌های اضافی خواهد شد و اگر عرض قالب کم‌تر از حداقل مقدار مورد نیاز باشد، مواد از کناره‌های قالب بیرون زده و نمی‌توان تغییر شکل مناسبی برای قطعه ایجاد نمود. با بررسی آزمایش‌ها، بیشترین میزان عرض مورد نیاز در انتهای ضربه‌ی اول رخ می‌دهد؛ به همین دلیل، میزان ازدیاد عرض بیلت فقط برای ضربه‌ی اول بررسی گردیده است. رابطه‌ی (٤) حداکثر درصد ازدیاد عرض بیلت را بیان می‌کند. در این رابطه،R2 ، ۰/۹۰ است:

$$V = \left|-964.20r^{0.002} - 1093.25L^{-0.008} + 863.84b^{-0.013}\right.$$
$$\left.805.64\mu^{0.005} + 290.19\left(\frac{G}{b}\right)^{0.29} - 896.73\right| , R^2 = 0.90 \qquad (٤)$$

همان طور که گفته شد، توزیع مناسب مواد، علاوه بر آن که از ایجاد عیب و نقص در قطعه ممانعت به عمل می‌آورد، موجب دستیابی به ساختار دآن‌های و استحکام مناسب در قطعه‌ی نهایی می‌گردد؛ از این رو پیش‌بینی میزان توزیع طولی و عرضی مواد برای قالب طراحی شده بسیار مهم است. رابطه‌ی (۵) درصد

ازدیاد طول نهایی بیلت در پایان ضربه‌ی چهارم در فرآیند فولرینگ چهار ضربه‌ای را بیان می‌کند. در این رابطه، R^2، ۰/۹۳ است:

$$L = \left| 1376.11R^{-0.005} + 1820.81L^{-0.004} + 3422.70b^{0.005} \right.$$

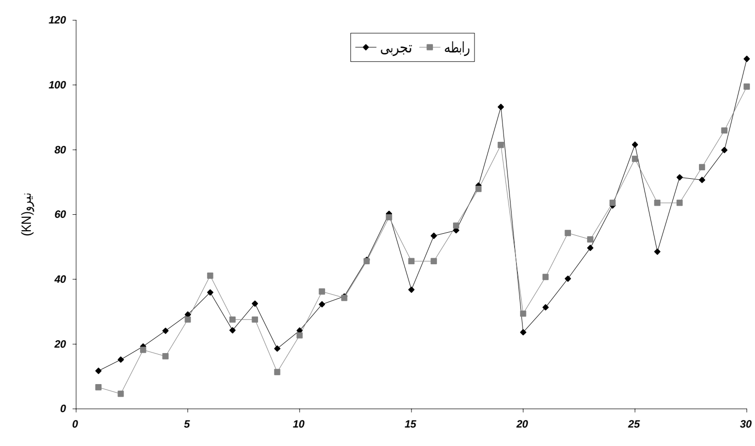
$$\left. 0.87\mu^{-0.90} + 88.45\left(\frac{G}{b}\right)^{-1.18} - 6710.21 \right| ,R^2 = 0.93 \quad (۵)$$

مقایسه‌ی نتایج روابط و آزمایش‌های عملی

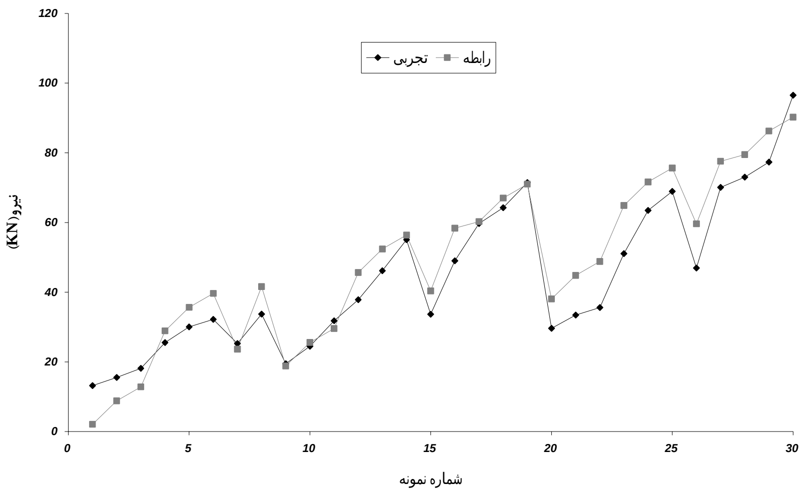
نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی در جدول (۲) با یک شماره برچسب خورده است که با وارد کردن متغیرهای مربوط به هر شماره در روابط (۲ تا ۵)، نتایجی به دست آمده است که مقایسه‌ی این نتایج و نتایج آزمایش‌ها در شکل‌های (٦ تا ۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در اکثرنمودارها و شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، نتایج تجربی و نتایج به دست آمده از روابط هم‌خوانی نسبتاً خوبی با هم دارند. مشاهده می‌شود که نتایج به خوبی یکدیگر را تأیید می‌کنند؛ بدین ترتیب می‌توان اذعان داشت که پیش‌بینی روابط به دست آمده در این مقاله، برای فرآیند فولرینگ چهار ضربه‌ای در محدوده بیان شده در جدول (۱) و محدوده‌های نزدیک به این اعداد و تحت شرایط متفاوت نیز منطقی و قابل قبول می‌باشد.

جدول ۲ پارامترهای مربوط به هر شماره در آزمایش‌های تجربی که با روابط مقایسه شد

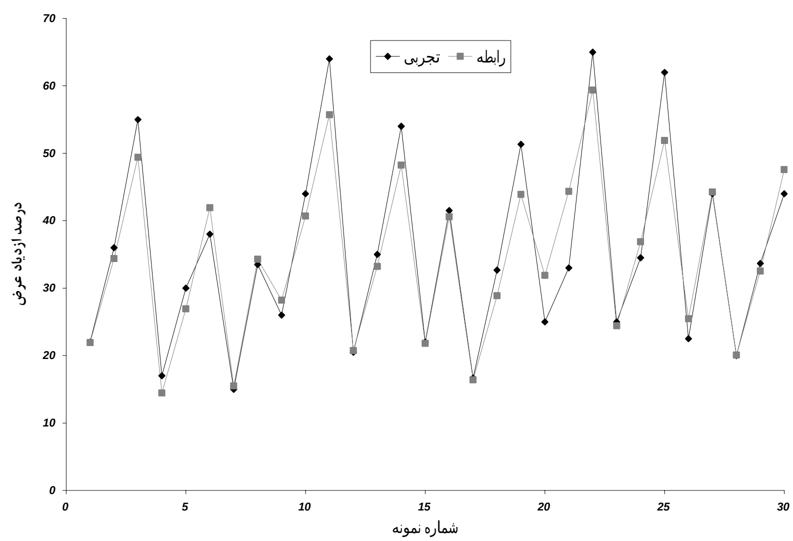
No.	*R* (mm)	*L* (mm)	*B* (mm)	μ	G/b
1	25	20	10	0.250	0.80
2	25	20	10	0.250	0.70
3	25	20	10	0.250	0.60
4	25	20	20	0.250	0.80
5	25	20	20	0.250	0.70
6	25	20	20	0.250	0.60
7	25	20	20	0.068	0.70
8	25	20	20	0.577	0.70
9	25	40	10	0.250	0.80
10	25	40	10	0.250	0.70
11	25	40	10	0.250	0.60
12	25	40	20	0.250	0.80
13	25	40	20	0.250	0.70
14	25	40	20	0.250	0.60
15	25	40	20	0.068	0.70
16	25	40	20	0.577	0.70
17	25	40	30	0.250	0.80
18	25	40	30	0.250	0.70
19	25	40	30	0.250	0.60
20	25	60	10	0.250	0.80
21	25	60	10	0.250	0.70
22	25	60	10	0.250	0.60
23	25	60	20	0.250	0.80
24	25	60	20	0.250	0.70
25	25	60	20	0.250	0.60
26	25	60	20	0.068	0.70
27	25	60	20	0.577	0.70
28	25	60	30	0.250	0.80
29	25	60	30	0.250	0.70
30	25	60	30	0.250	0.60



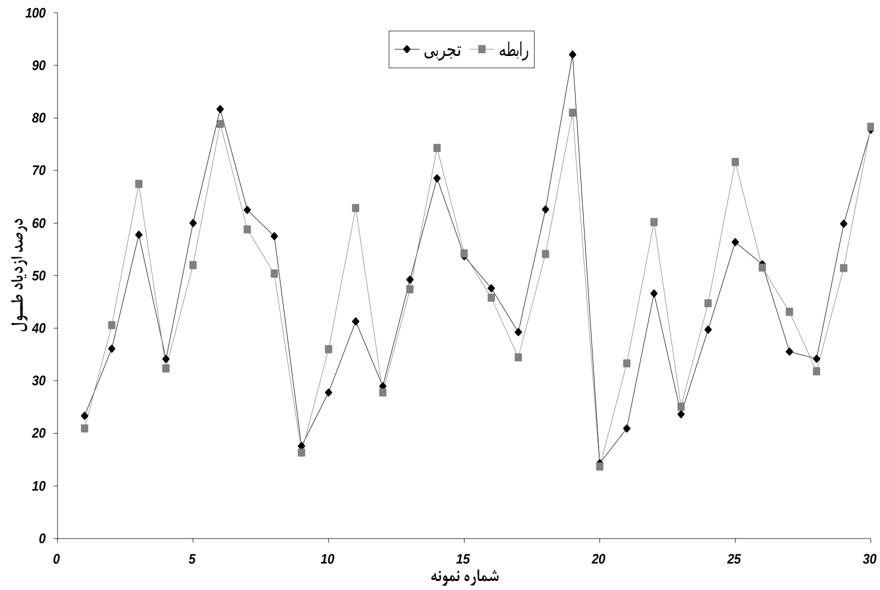
شکل ٦ مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده از رابطه‌ی ۲، برای نیرو در ضربه‌ی اول بر حسب شماره نمونه‌ها (در شکل‌های ٦ تا ۹ پارامترهای مربوط به هر شماره در جدول ۲ آمده است)



شکل ۷ مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده از رابطه‌ی ۳، برای نیرو
در ضربه‌ی دوم بر حسب شماره نمونه‌ها



شکل ۸ مقایسه‌ی درصد ازدیاد عرض بیلت به دست آمده‌ی نتایج آزمایش‌ها و
نتایج رابطه ٤، برحسب شماره نمونه‌ها



شکل ۹ مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده از رابطه‌ی ۵، درصد ازدیاد طول نهایی ضربه‌ی چهارم بر حسب شماره نمونه‌ها

نتیجه‌گیری

براساس مشاهدات صورت گرفته در این تحقیق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- در صنعت پیش‌بینی جریان فلز پس از فرآیند فولرینگ چهار ضربه‌ای بسیار ضروری و از طرفی دیگر، امری مشکل می‌باشد و به تجربه‌ی زیادی برای پیش‌بینی جریان فلز نیاز است. کاربر با استفاده از رایانه و شبیه‌سازی فرآیند، می‌تواند هندسه‌ی خروجی قالب پیش‌فرم فولر را پیش‌بینی کند، اما این کار هزینه‌بر و وقت‌گیر است؛ بنابراین با داشتن چند رابطه برای پیش‌بینی توزیع مواد و یا برآورد نیروی آهنگری طی فرآیند فولرینگ چهارضربه‌ای، به راحتی و بدون نیاز به انجام آزمایش‌های گران قیمت و یا شبیه‌سازی‌های عددی پیچیده، می‌توان پیش‌بینی‌های لازم را انجام داد.

۲- نتایج ارائه شده در این مقاله، موید این نکته است که شبیه‌سازی‌های فرآیند فولرینگ در نرم افزار ANSYS، می‌تواند به عنوان ابزاری مطمئن جهت انتخاب ماشین آهنگری مورد نیاز، طراحی پارامترهای هندسی مختلف قالب و نیز انجام اصلاحات احتمالی مورد استفاده قرار گیرد.

۳- روابط، نشان می‌دهد که با افزایش شعاع قالب و طول قالب نیروی آهنگری در ضربه‌ی اول و دوم افزایش یافته، ولی با افزایش عرض بیلت و ضریب اصطکاک نیرو در ضربه‌ی اول افزایش یافته در صورتی که نیرو در ضربه‌ی دوم کاهش می‌یابد و با افزایش دهانه‌ی قالب بر عرض بیلت نیرو در ضربه اول کاهش و در ضربه دوم افزایش می‌یابد.

٤- هم‌چنین این روابط بیان می‌کند که با افزایش شعاع قالب، طول قالب و نسبت دهانه‌ی قالب به عرض بیلت درصد ازدیاد طول و درصد ازدیاد عرض، کاهش یافته و با افزایش عرض بیلت و کاهش ضریب اصطکاک، درصد ازدیاد طول افزایش یافته و درصد ازدیاد عرض کاهش می‌یابد.

۵- شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میان‌یابی بـا اسـتفاده از روابـط اسـتخراج شـده، نتـایج قابـل قبـولی ارائـه می‌نمایـد، امـا در زمـانی کـه از ایـن روابـط بـرای برون‌یـابی اسـتفاده شـود، فقـط در محـدوده‌هـای نزدیک به حـد بـالایی و حـد پـایینی آزمـایش‌هـا جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهند.

مراجع

۱. فرشته صنیعی؛ فرامرز و خلیلی گشنیگانی؛ مریم، " برآورد نیرو و ازدیاد طول در فرآیند آهنگری در قالب باز"، دومین کنفرانس بین المللی ساخت و تولید، آذرماه (۱۳۸٦).

۲. خلیلی گشنیگانی؛ مریم، پورسینا؛ مهرداد و فرشته صنیعی؛ فرامرز،" برآورد نیرو در فرآیند فولرینگ به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی"، شانزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، اردیبهشت ماه (۱۳۸۷).

3. Fereshteh-Saniee, F., Pillinger, I., Hartley, P. and Hall, F.R.," *A three-dimensional study of flow in the fullering process using an elastic-plastic finite-element simulation*", J. of MPT, Vol. 60, pp. 427-433, (1996).

4. Biswas, S. K. and Knight, W. A., *"Computer-aided design and manufacture of dies for long hot forging dies"*, International journal produce Res, Vol. 14, p. 23, (1976).

5. Chan, Y. K. , Mullimeux, G. and Knight, W. A., *"Progress in the computer aided design and manufacture of hot forging die"*, proceeding 20th M. T. D. R. conference, Birmingham, p. 29, (1979).

6. Choi, S. H. and Dean, t. A., *"Computer aided design and machining of fuller dies for forging hammers"*, International Journal Machine Tool Design Res, Vol. 24 , (1984).

7. Choi, S. H. and Dean, T. A., *"Computer aids to data preparation for cost estimation and perform design for drop forging on hammers"*, International Journal Machine Tool Design Res, Vol. 24, (1984).

8. Fereshteh-Saniee, F., Pillinger, I. and Hartley, P., *"Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes"*, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 153-154, Pages 151-156, 10 November (2004).

۹. حقیقت؛ ح. و صادقی؛ م. ح.، "نرم‌افزاری برای طراحی قالبهای پیش‌فرم و نهایی فورجینگ قطعات طولی"، سومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، (۱۳۷٤).

۱۰. ملکیان؛ م. م.، "طراحی مراحل شکل‌دهی و قالبهای فورجینگ قطعات پیچیده با استفاده از مدلسازی فیزیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۵).

11. Mielnik, E. M., *"Metalworking science and engineering"*, McGraw-Hill, Inc., (1991).

12. Kalpakjian, S., *"Manufacturing engineering and technology"*, Addison-Wesley Publishing Company, (1992).

13. Tomlinson, A., Met, A.and Stringer, B., "*Spread and elongation in flat tool forging*", Mechanical

Working Division of the British Iron and Steel a Reasearch Association, (1959).

۱٤. بیدرام؛ ر.، " Eviews همگام با اقتصاد سنجی" ، انتشارات منشور بهره‌وری، تهران، (۱۳۸۱).